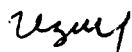


0721687-1

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Измайлов Игорь Саматович



ПЗС-НАБЛЮДЕНИЯ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД,
СПУТНИКОВ БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ И АСТЕРОИДОВ С ПОМОЩЬЮ
ДЛИННОФОКУСНОГО РЕФРАКТОРА

специальность 01.03.01 –
астрометрия и небесная механика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург 2001

Работа выполнена в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор Киселев Алексей Алексеевич.

Официальные оппоненты –

доктор физико-математических наук, профессор Губанов Вадим Сергеевич,
кандидат физико-математических наук Девяткин Александр Вячеславович.

Ведущая организация: Государственный Астрономический Институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета.

Защита состоится 31 мая 2001 года в 16 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д 212.232.15 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в Санкт-Петербургском государственном университете (Санкт-Петербург, Петродворец, Библиотечная пл. 2, аудитория 2143).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета (по адресу Санкт-Петербург, Университетская набережная 7/9).

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000975820

Автореферат разослан 12 апреля 2001 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

В. В. Орлов.

В последние несколько десятилетий на 26-дюймовом рефракторе ($F=10413$ мм, $D=650$ мм) Главной астрономической обсерватории в Пулкове ведутся систематические наблюдения визуально-двойных звезд и спутников больших планет. В связи с появлением техники на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) возникла необходимость в разработке и внедрении новых методов наблюдений и их обработки. При этом мы исходили из того, что не существует общепринятой процедуры обработки ПЗС-наблюдений визуально-двойных звезд и спутников больших планет и что наблюдения на рефракторе с помощью ПЗС-техники, безусловно, имеют ряд особенностей, отличающих их от наблюдений на рефлекторах. Например, остаточная хроматическая аберрация, имеющаяся у рефракторов, радикально меняет форму изображений. Также необходимо было обеспечить преемственность между разрабатываемыми методами и уже используемыми оригинальными методиками.

В настоящее время в лаборатории фотографической астрометрии Пулковской обсерватории широко используются два устройства на основе ПЗС-техники – ПЗС матрица, применяемая для наблюдений, и сканер с проекционной приставкой, используемый для измерения астрофотографий. Объединяет данные устройства то, что в итоге мы имеем дело с оцифрованными изображениями, соответственно и методы обработки таких изображений достаточно схожи.

Ключевым для любого метода анализа оцифрованных изображений является алгоритм определения центра объекта. Существующие алгоритмы, с точки зрения применимости для обработки наблюдений на длиннофокусном телескопе, обладают тем недостатком, что имеют недостаточный контроль корректности такого алгоритма, в применении к изображению, создаваемому конкретным инструментом. (В случае длиннофокусного телескопа это особенно важно.)

Существует достаточно большое число универсальных программных продуктов, в которых реализуется обработка изображений; кроме указанного принципиального недостатка, им присущи следующие практические недоработки:

1) Как правило, реализуется лишь первый этап обработки - получение координат в системе, связанной с изображением.

2) Недостаточная автоматизация измерений. Так при обработке серии схожих ПЗС-кадров необходимо открыть очередной кадр, измерить все объекты, записать результаты и закрыть кадр. Такой алгоритм в случае, когда серия насчитывает 100 и

более изображений, как это принято при наблюдениях визуально-двойных звезд, требует больших затрат времени.

Указанные обстоятельства диктуют необходимость разработки собственных методов анализа численных изображений, и реализации разработанных методов в виде оригинального пакета программ.

В данной диссертации приведены результаты методических исследований в связи с применением ПЗС-техники на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке, а также при измерениях астрофотографий, полученных на этом же инструменте. Приводятся результаты наблюдений двойных и кратных звезд, спутников больших планет и астероидов. Кроме того, даны результаты определения орбит четырех визуально-двойных звезд методом параметров видимого движения (ПВД) с дифференциальной коррекцией.

Автор выносит на защиту:

- 1) Методику обработки позиционных ПЗС-наблюдений визуально-двойных звезд, спутников больших планет и астероидов на длиннофокусном рефракторе.
- 2) Метод измерений астрофотографий с помощью сканера общего назначения.
- 3) Алгоритм метода ПВД с дифференциальной коррекцией начальных данных.

Апробация работы.

Результаты диссертации докладывались на научных семинарах астрометрических отделов ГАО РАН, на семинарах астрономической кафедры Санкт-Петербургского государственного университета, а также на Всероссийской конференции с международным участием "Наблюдения естественных и искусственных тел Солнечной системы" (ИТА РАН, СПб 1996).

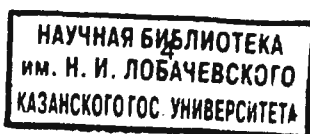
Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, списка цитируемой литературы и содержит 125 страниц, 25 иллюстраций. Библиография - 85 наименований.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель проведенной работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена вопросам получения и обработки наблюдений, выполненных с помощью ПЗС-матрицы. Рассматриваются следующие этапы обработки



1. Выделение изображений объектов. Для обработки изображения какого-либо конкретного объекта первоначально необходимо выделить ту область матрицы, на которой располагается данное изображение. За предварительные координаты центра области принимался самый яркий пиксел, за центр второго по яркости объекта принимался самый яркий пиксел, не принадлежащий первому объекту и т. д.

Поскольку программа наблюдений не содержала протяженных объектов, данная область имела форму круга постоянного радиуса, т. к. было показано, что при дифференциальных измерениях для минимизации систематической ошибки, связанной с блеском, необходимо анализировать изображения объектов в областях одинакового размера.

2. Определение уровня фона. Данная величина вычисляется по частотной гистограмме значений отсчетов на элементах матрицы.

При наблюдениях спутников больших планет возникают дополнительные трудности в связи с присутствием ореола. В нашем случае эти трудности еще более усугубляются тем, что наблюдения сделаны на рефракторе, и поэтому кроме атмосферного рассеянного света, присутствует ореол, образуемый далекими синими и красными, не сведенными в общий фокус, лучами. Т. к. большую часть наших наблюдений спутников планет составляют наблюдения спутников Сатурна, кольца которого совместно с самой планетой создают весьма сложную структуру ореола, аппроксимация фона по всему полю зрения в нашем случае невозможна. Поэтому ореол аппроксимировался в некоторой локальной зоне, а именно, в кольце вокруг обрабатываемого объекта. Причем для аппроксимации использовалась полная квадратичная форма.

3. Определение центра ПЗС-изображений объектов. Для определения точных координат объектов мы испытали пять различных методов: один метод центра тяжести и четыре метода модельной аппроксимации. Конечной целью исследования этих методов являлось выбор метода, оптимального для используемого нами длиннофокусного рефрактора в условиях данного астроклимата. Метод должен был обеспечивать наиболее точное и стабильное определение центра изображений объектов, в наименьшей степени зависящее от условий наблюдений (размера турбулентного диска, блеска, длины экспозиции, устойчивости изображений и т. д.).

Модели, испытанные в нашей задаче имеют следующий вид:

$$I(x, y) = \exp(A(x - x_0)^2 + B(y - y_0)^2 + C), \quad (1)$$

$$I(x, y) = \exp(A(x - x_0)^2 + B(y - y_0)^2 + C) + D, \quad (2)$$

$$I(x, y) - I_F = \frac{1}{A(x - x_0)^2 + B(y - y_0)^2 + C}, \quad (3)$$

$$I(x, y) - I_F = \frac{1}{A(x - x_0)^2 + B(y - y_0)^2 + C} + D, \quad (4)$$

где x, y - координаты элемента изображения; x_0, y_0 - координаты центра; A, B, C, D - параметры модели; I - отсчет ПЗС-матрицы на элементе с координатами x, y ; I_F - уровень фона.

Для определения параметров модели использовался алгоритм метода наименьших квадратов (МНК) для нелинейных систем.

Всеми пятью методами были измерены 4 серии ПЗС-наблюдений визуально-двойной звезды ADS 14636 (61 Cyg), 3 серии изображений ADS 3400 и серия изображений с 8-м и 5-м спутниками Сатурна. При сравнении результатов измерений разными методами сделаны следующие выводы: 1. Точность определения расстояния между объектами и позиционных углов несколько хуже в методе центра тяжести и примерно одинакова в методах модельной аппроксимации. 2. Ошибки единицы веса при модельной аппроксимации изображений наименьшие для модели (4).

4. Разделение взаимодействующих изображений объектов. Определенные трудности возникают при анализе изображений двух близких звезд, турбулентные диски которых перекрываются. Такие условия типичны при наблюдениях тесных двойных звезд.

Как известно, характеристическая кривая ПЗС-матриц линейна, поэтому для обработки ПЗС-наблюдений тесных визуально-двойных звезд изображения, компонент которых взаимодействуют, была использована модель, представляющая собой сумму профилей одиночных звезд. В нашем случае для наблюдений, выполненных на 26-дюймовом рефракторе, использовался профиль, задаваемый (4)

$$I(x, y) - I_F = \frac{1}{A_1(x - x_0)^2 + B_1(y - y_0)^2 + C_1} + \frac{1}{A_2(x - x_0 - \rho \sin \theta)^2 + B_2(y - y_0 - \rho \cos \theta)^2 + C_2} + D, \quad (5)$$

где параметры A_1 , B_1 , C_1 относятся к главному компоненту звезды; A_2 , B_2 , C_2 - к спутнику; ρ и θ - расстояние между компонентами и позиционный угол двойной звезды.

С использованием модели (5) были измерены 10 ПЗС-наблюдений визуально-двойной звезды ADS 10345 (μ Dra), выполненных в течение 1997 года. При этом были получены следующие результаты

расстояние между компонентами в секундах дуги $\rho = 2'' \cdot 2277 \pm 0.0027$;

позиционный угол двойной звезды $\theta = 22^\circ \cdot 392 \pm 0.068$.

Это соответствует внешней ошибке одного наблюдения в радиальном направлении - $0''.0086$, в трансверсальном - $0''.0079$.

5. Калибровка ПЗС-матрицы производилась путем сравнения полученных практически одновременно ПЗС и фотографических изображений шарового скопления М3. Найдены 6 постоянных перехода от координат в системе ПЗС-матрицы к системе прямоугольных координат, полученных в результате измерений астрофотографий на приборе "Аскорекод".

Имея в виду результаты калибровки, в дальнейшем мы предусматривали следующую процедуру перехода от измеренных изображений объектов в поле ПЗС-матрицы к их относительным положениям на небесной сфере:

На первом этапе матричные координаты всех объектов в пикселах преобразовывались к прямоугольным координатам, выраженным в мм, по формулам с шестью постоянными.

Далее выполнялась ориентировка по суточному следу звезды. Наиболее надежный способ, по нашему мнению, заключается в выполнении ориентировки по суточной параллели. Для этого через поле матрицы пропусклась звезда при остановленном часовом механизме телескопа.

После определения ориентировки измеренных координат выполнялись стандартные редукции согласно методике "след-масштаб".

В первой главе также приведены результаты наблюдений сближений малых планет со звездами, спутников больших планет и визуально-двойных звезд. В зависимости от типа объектов, разработана методика наблюдений.

Основная идея наблюдений сближений малых планет со звездами заключается в следующем.

Как известно, в настоящее время внешняя ошибка ПЗС-наблюдений малых планет значительно хуже внутренней. Это связано с недостаточной точностью применяемых для астрометрической редукции каталогов - GSC и USNO. Необходимость применения именно этих каталогов обусловлена малым полем ПЗС-камер и тем, что только данные каталоги имеют необходимую плотность звезд для применения классических методов определения координат.

Один из путей решения указанной проблемы - наблюдения малых планет по методу "след-масштаб", во время их прохождения вблизи звезды, входящей в высокоточные астрометрические каталоги - Гиппаркос, Тихо, АСТ.

В соответствии с предлагаемой методикой из наблюдений определяются следующие величины, которые могут быть использованы для улучшения орбит малых планет:

- момент максимального сближения между планетой и звездой;

- минимальное расстояние между планетой и звездой;

- разность координат (прямого восхождения и склонения) "планета – звезда" в момент минимального сближения;

- скорости движения планеты по прямому восхождению и склонению.

Всего в 1998-1999 годах в Пулковке на 26-дюймовом рефракторе с ПЗС-камерой наблюдались 6 сближений со звездами. Точность полученных результатов составила для момента максимального сближения 1^s-20^s , в зависимости от скорости движения планеты; для минимального расстояния и разностей координат $0''.004-0''.018$; для скоростей движения планеты $0.005-0.025''/\text{час}$.

В 1995-2000г на 26-дюймовом рефракторе также производились ПЗС-наблюдения спутников Сатурна и Юпитера. Всего за весь период наблюдений было получено и обработано 532 отдельных ПЗС-изображений спутников Сатурна, и 270 ПЗС-изображений спутников Юпитера. Результатами наблюдений являлись разности координат "спутник-спутник". Ошибки измерений в случайном отношении составили около $0''.01$.

Для визуально-двойных звезд с апреля 1996 по май 1999 года на 26-дюймовом рефракторе было проведено 296 наблюдений. Во время каждого наблюдения снималась серия экспозиций двойной либо кратной звезды, причем каждая экспозиция выполнялась на отдельном ПЗС-кадре. Число изображений в серии составляло от 10 до 100. Всего было получено 13780 ПЗС-изображений, пригодных

для обработки. Длительность экспозиций составляла от $0^s.1$ до 1^m в зависимости от яркости и расстояния между компонентами визуально-двойной звезды. Основная часть наблюдений была выполнена с экспозицией $0^s.5$. Как показывает анализ результатов обработки, ошибка измерений серии ПЗС-кадров, полученных в результате одного наблюдения, для 26-дюймового рефрактора составляет 0.01-0.02 секунды дуги, что находится на современном мировом уровне точности подобных наблюдений либо превосходит этот уровень.

Во второй главе рассматривается методика высокоточных измерений астрофотографий на основе сканера общего назначения. Данная методика детализируется следующим образом

1. Фотоизображение какого-либо объекта измеряется с помощью метода модельной аппроксимации при использовании профиля Лоренца

$$d = \frac{1}{(A(x-x_0)^2 + B(y-y_0)^2)^\alpha + C} + D. \quad (6)$$

Величина α при отсутствии взаимодействия изображений объектов принималась постоянной для серии измерений. В каждом конкретном случае значение α определялось по какому-либо одному изображению путем минимизации ошибки единицы веса при аппроксимации изображения моделью. Т. е. производились измерения данного изображения с разными α , и выбиралось то значение α , для которого ошибка единицы веса становилась минимальной.

2. Калибровка сканера была произведена путем сравнения измерений одной и той же пластинки на сканере и на "Аскореорде". Также было установлено, что сканер позволяет получить приемлемую точность измерений только по одной координате, соответствующей направлению ПЗС-линейки, поэтому каждую пластинку необходимо измерять два раза с поворотом на 90 градусов.

Для перехода от координат в системе сканера к измеренным координатам была принята следующая модель:

$$\begin{aligned} X &= a_1 + b_1x + c_1y + dx^2, \\ Y &= a_2 + b_2x + c_2y, \end{aligned} \quad (7)$$

здесь X, Y - измеренные координаты; x, y - координаты в системе сканера; $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2$ - коэффициенты перехода от одной системы координат к другой, полученные в результате калибровки.

3. Т. к. точность измерений по Y значительно хуже точности по X , каждая пластинка должна измеряться два раза с поворотом на 90 градусов. В результате мы получаем две системы координат X_1, Y_1, X_2, Y_2 , связанные соотношениями

$$\begin{aligned} X_1 &= X_2 \cos \psi - Y_2 \sin \psi, \\ Y_1 &= X_2 \sin \psi + Y_2 \cos \psi, \end{aligned} \quad (8)$$

где угол ψ близок к 90 градусам. При этом ортогональная система координат X, Y задается формулами

$$\begin{aligned} X &= X_1, \\ Y &= X_2 \sin \psi + Y_2 \cos \psi. \end{aligned} \quad (9)$$

В диссертации описан метод, позволяющий с необходимой точностью определить данный угол поворота между двумя системами измерений на основании первого соотношения (8).

4. Для испытания сканера как измерительной системы было измерено около 250 пластинок с изображениями визуально-двойных звезд. В том числе для восьми двойных, а именно ADS 2757, ADS 3353, ADS 7724 (γ Leo), ADS 8100, ADS 8861, ADS 8424, ADS 9444 и ADS 11632 было измерено по несколько десятков пластинок. Для каждой звезды были вычислены параметры относительного движения. Эти же параметры были определены на основании измерений с помощью комплекса "Аскорекорд" (исключая ADS 7724 и ADS 8424). В обоих случаях применялись одинаковые формулы редукции для перехода от измеренных координат к относительным положениям компонент.

Как свидетельствуют результаты измерений, в задаче измерения визуально-двойных звезд сканер имеет значительное преимущество перед "Аскорекордом" (в смысле точности). Ошибка одного измерения на сканере лучше в 2-3 раза, а ошибка измерения одной пластинки лучше в 1.5 раза.

Можно отметить также некоторое систематическое отличие параметров, полученных двумя измерительными системами, что характерно для подобного типа измерений.

Наиболее показательно данное увеличение точности для ADS 8100AC. По измерениям на сканере удалось выявить периодические колебания компонента "С" относительно главной звезды, предположительно вызываемые невидимым спутником. При измерениях же на "Аскорекорде" данные колебания "замываются" случайными ошибками.

В третьей главе приведены результаты определения орбит четырех визуально-двойных звезд: ADS 8242, ADS 5400 (12 Lyn), ADS 7724 (γ Leo) и ADS 10345 (μ Dra) методом ПВД с дифференциальной коррекцией.

Метод ПВД первоначально был разработан А. А. Киселевым для определения орбит искусственных спутников Земли, позднее широко применялся для определения орбит визуально-двойных звезд из наблюдений коротких дуг. Установка на 26-дюймовом рефракторе ПЗС-камеры позволила получить высокоточные наблюдения тесных, с расстоянием между компонентами от 1", двойных систем. Такие звезды, как правило, имеют большие наблюдаемые участки орбиты, чем системы, которые наблюдаются фотографически. Метод ПВД в исходном варианте для таких звезд практически неприменим, поскольку ориентирован на короткие дуги. При этом данный метод имеет ряд несомненных преимуществ перед классическими методами определения орбит. Дополнение метода ПВД дифференциальной коррекцией исходных данных обусловило возможность применить этот метод для звезд, существенная часть орбиты которых охвачена наблюдениями.

Смысл метода ПВД с дифференциальной коррекцией состоит в том, что первоначальные значения ПВД согласуются с наблюдениями путем определения поправок параметров Δp_i на основе дифференциальных формул типа:

$$\sum_{i=1}^{l=m} \frac{\partial \rho}{\partial p_i} \Delta p_i = (O - C)_\rho, \quad (10)$$

$$\rho \sum_{i=1}^{l=m} \frac{\partial \theta}{\partial p_i} \Delta p_i = \rho(O - C)_\theta,$$

образующих систему условных уравнений по числу наблюдений, для решения по способу наименьших квадратов. Здесь m – число изменяемых параметров p_i , $\partial \rho / \partial p_i$ и $\partial \theta / \partial p_i$ – частные производные ρ и θ по p_i , определяемые численными методами.

Основными результатами диссертации являются

1) Предлагаемый метод обработки позиционных ПЗС-наблюдений визуально-двойных звезд, спутников больших планет и астероидов для 26-дюймового рефрактора ГАО РАН обеспечивает ошибку серии ПЗС-кадров, полученных в результате одного наблюдения 0".01-0".02. Данным методом было получено и обработано более 15000 отдельных ПЗС-кадров.

2) Показана возможность применения сканирующих устройств общего назначения для высокоточных позиционных измерений астрофотографий. Конкретный экземпляр планшетного сканера Umax PowerLook II, имеющийся в распоряжении автора, обеспечивает точность измерений в 1.5 раза лучше, чем система "Аскорекод". Измерено 8 рядов наблюдений двойных звезд, всего более 250 пластинок.

3) Разработан алгоритм, позволяющий расширить область применения метода ПВД для визуально-двойных звезд, наблюдения которых охватывают значительный участок орбиты.

4) Методом ПВД с дифференциальной коррекцией исходных данных определены орбиты четырех визуально двойных звезд.

Основные положения и результаты работы изложены в следующих статьях:

1. Измайлов И. С., Киселев А. А. и др. Применение ПЗС-камеры в Пулковских программах наблюдений двойных и кратных звезд и спутников больших планет на 26-дюймовом рефракторе. ПАЖ, 1998, N10 с. 772-779.
2. Измайлов И. С. Применение сканера общего назначения для позиционных измерений астрофотографий. // Известия ГАО в Пулкове, с. 533, N214, СПб., 2000.
3. Измайлов И. С., Киселев А. А. и др. ПЗС-наблюдения сближений звезд с малыми планетами на 26-дюймовом рефракторе в Пулкове. //Известия ГАО в Пулкове, с. 171, N213, СПб., 1998.
4. Киселев А. А., Романенко Л.Г., Измайлов И. С., Грошева Е. А. Новые орбиты 9-визуально-двойных звезд, выведенные методом параметров видимого движения. // Известия ГАО в Пулкове, с. 239, N214, СПб., 2000.
5. Грошева Е. А., Измайлов И. С. Исследование визуально-двойной звезды ADS 8100 AC. //Известия ГАО в Пулкове, с. 255, N214, СПб., 2000.
6. Киселева Т. П., Киселев А. А., Хруцкая Е. В., Измайлов И. С., Калининченко О. А. Результаты фотографических и ПЗС-наблюдений системы спутников Сатурна на 26-

дьюймовом рефракторе в Пулкове в 1995 г. // Известия ГАО в Пулкове, с. 76, N210, СПб., 1996.

7. Киселева Т.П., Измайлов И.С. Результаты ПЗС-наблюдений спутников Юпитера и Сатурна на 26-дьюймовом рефракторе в Пулкове. // Известия ГАО в Пулкове, с.333, N214, СПб., 2000.

Во всех совместных работах автору принадлежит разработка методов обработки ПЗС-наблюдений и практическая реализация разработанных методов, а также в 4-й работе определение двух из девяти орбит.



Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН.

Подписано к печати 04.04.2001, тираж 100 экз., формат 60×84/16,
объем 0,75 усл. печ. л.

d. 20